



# Étude expérimentale et analyse énergétique des constructions en bois massif

Photo : Confort Bois

*Compte-rendu de la thèse de doctorat "Caractérisation hygrothermique, par une approche multiéchelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale", réalisée par Saed Raji au laboratoire TREFLE (Transferts Ecoulements Fluides Energétique, université Bordeaux I, décembre 2006).*

**L**a consommation croissante d'énergies fossiles et de minéraux a conduit les pays industrialisés à une forte prise de conscience environnementale orientée vers la diminution des consommations et l'utilisation d'énergies et de matériaux renouvelables. Le Programme national de lutte contre le changement climatique (PNLCC-2000), puis le Plan climat 2004 et sa dernière évolution en 2006 définissent les engagements de la France en matière de réduction des gaz à effet de serre. Leur application doit permettre de revenir, en

moyenne annuelle sur la période 2008-2012, au niveau d'émission constaté sur l'année 1990. Le secteur du bâtiment contribue fortement à ces émissions, essentiellement sous forme de CO<sub>2</sub>. Signée en 2003, la DEPE 3, directive de l'Union européenne sur la performance énergétique des bâtiments, met l'accent sur la réduction des consommations grâce à de nouvelles normes de construction. Le but est de réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments en Europe, sans provoquer d'énormes dépenses supplémentaires,



tout en améliorant sensiblement le confort. Cette mesure législative vise à définir une méthodologie commune pour calculer les performances énergétiques d'un bâtiment, à fixer des normes minimales en matière de performance énergétique des nouveaux bâtiments et des rénovations des bâtiments existants, à utiliser un système de certification (étiquette énergie) des bâtiments pour rendre la consommation énergétique beaucoup plus visible par les propriétaires, les locataires et les utilisateurs.

À ce jour, quinze États membres de l'Union européenne exigent des performances énergétiques minimales pour les nouveaux bâtiments, avec de grandes différences entre eux, concernant les niveaux minimaux d'isolation thermique exigés. Dans cette étude, nous souhaitons caractériser, par une approche multiéchelle le comportement hygrothermique de maisons en bois massif, en vue d'améliorer la détermination des performances énergétiques et de valoriser les qualités thermiques et environnementales de ce type de construction.

### Construction bois face à la réglementation thermique

Dans l'Hexagone, la réglementation thermique française impose d'avoir, pour les parois verticales de bois massif empilé, un coefficient surfacique (coefficient  $U_{mur}$ ) inférieur ou égal à  $0,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  depuis la RT 2000, valeur ramenée à  $0,45$  depuis la RT 2005. Cette exigence, appelée "garde-fou", est fixée par rapport à des murs constitués d'éléments de structure et d'isolants dans une conception traditionnelle. Remarquons que l'épaisseur totale finale de ces parois extérieures est supérieure à 35 cm et dépasse souvent 40 cm avec la RT 2005. Pour satisfaire cette exigence, avec une conductivité thermique  $\lambda$  de  $0,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , l'épaisseur de

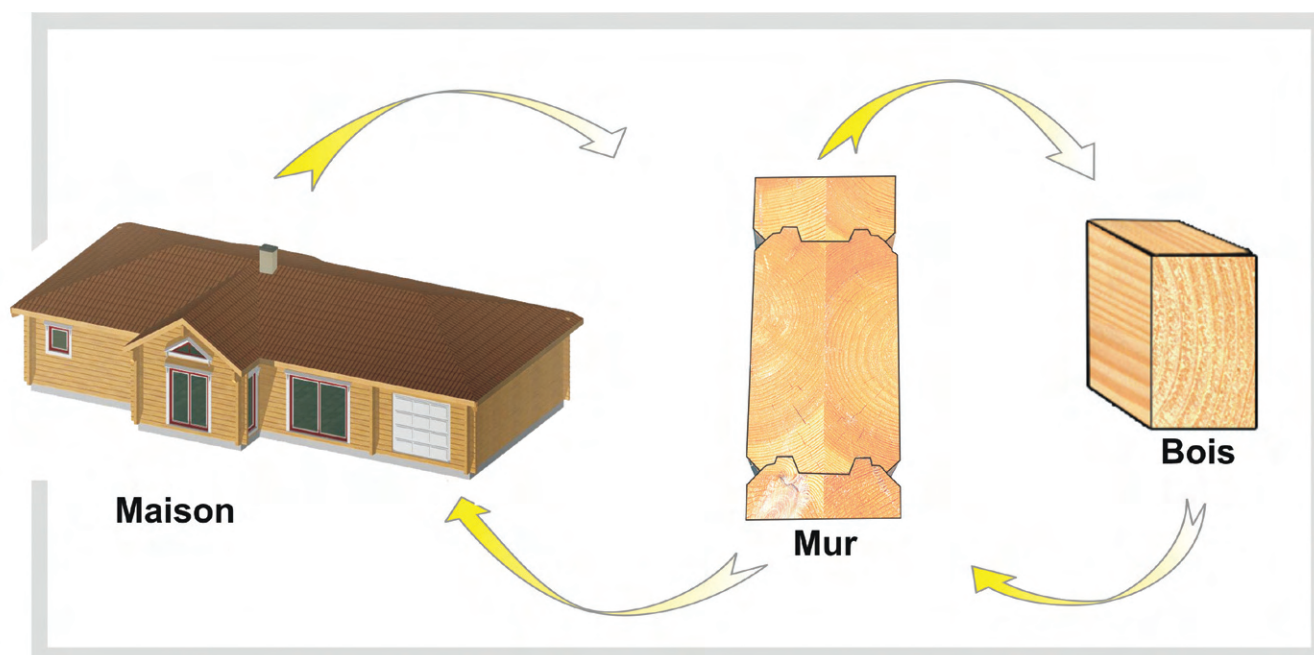
bois doit être de 24 cm au minimum pour toutes les parois extérieures, soit le double des pratiques actuelles.

**En dehors de conditions dérogatoires, ce "garde-fou" rend donc non réglementaire en France la majorité des constructions en bois.**

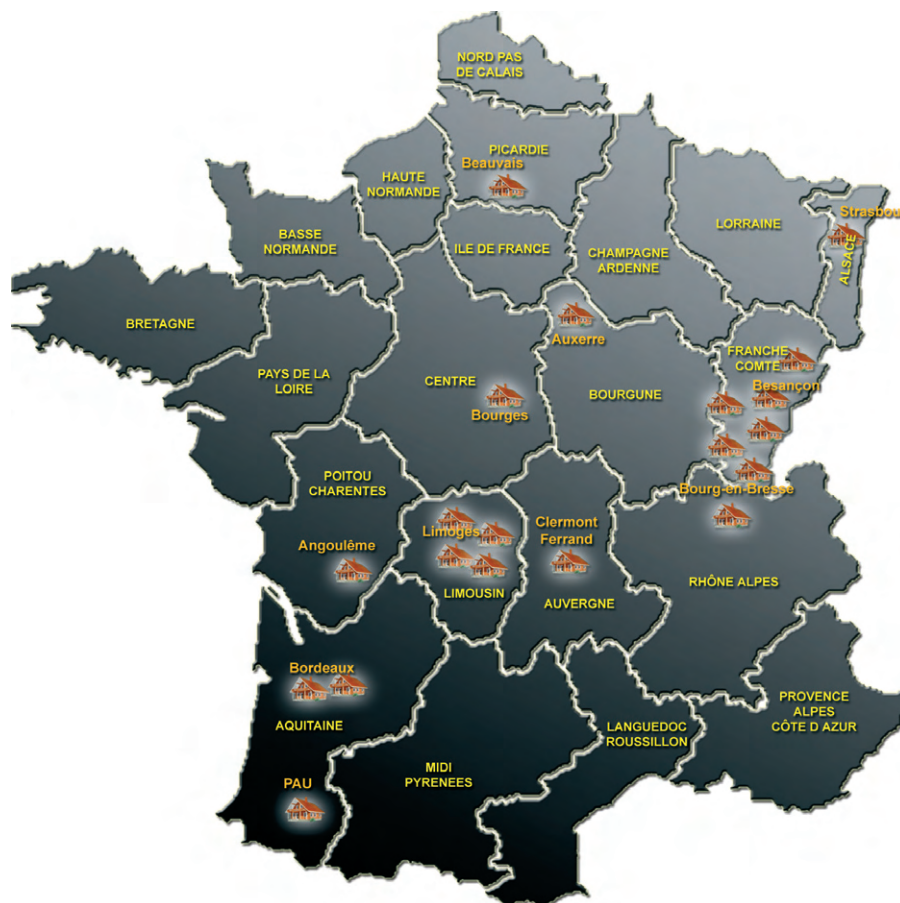
Aux États-Unis, un travail réalisé par la National Association of Home Builders North American Log Homes Council (NAHB, 1991) a montré que les maisons en bois massif sont au moins aussi efficaces que les constructions à ossature bois malgré un écart de 44 % entre la valeur moyenne des murs en bois massif et son équivalent en ossature bois.

Selon les résultats d'une étude nord-américaine (Pickett, 2003) sur la performance énergétique des maisons en bois massif, l'efficacité énergétique d'une maison en bois massif de 17 cm d'épaisseur égale, voire surpasse, celle d'une maison à ossature bois de 27 cm d'épaisseur. Les résultats ont conclu que les maisons en bois massif testées étaient aussi performantes que les maisons de construction conventionnelle bien isolées, même si leur coefficient  $U$  était inférieur de 44 %. En pratique, le propriétaire d'une maison en bois massif pourrait économiser de \$ 150 à \$ 400 par an sur sa facture de chauffage et climatisation, à conditions de confort équivalentes, dans des conditions atmosphériques réelles.

**Ces études semblent donc confirmer que la construction de bois massif est un mode de construction performant, tant pour le confort que pour l'économie d'énergie. Sa performance réelle en comparaison des solutions de parois comprenant ossature et isolation doit être réévaluée.**



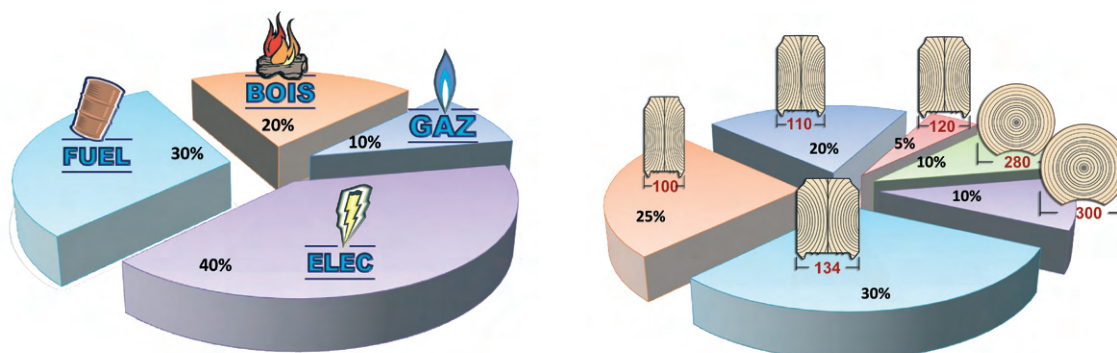
## Partie 1 : Campagne de mesures sur 20 maisons de 8 constructeurs et fabricants adhérents de l'Afcobois

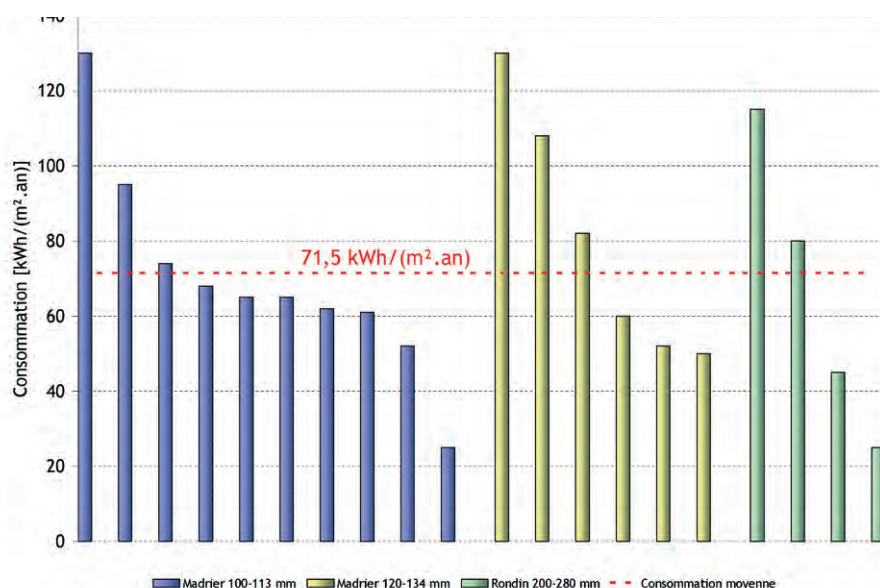


### Présentation de l'étude

En France, et depuis l'application de la RT 2000, les réflexions précédentes associées aux observations faites par les constructeurs et fabricants sur le terrain ont poussé les institutions à mener une étude sur le sujet. Initié et financé par la Fédération française du bâtiment (FFB, représentée par Judith Lego), la Région Franche-Comté et le réseau de constructeurs bois Afcobois (représenté par Frédéric Baeten), le projet "Habitat Bois Massif HBM PERFormant" a

été réalisé en collaboration entre le laboratoire TREFLE (représenté par Philippe Lagiere), le centre technique Costic (représenté par Vincent Bayetti) et le bureau d'études Pouget Consultants. L'étude a consisté à évaluer les performances énergétiques réelles de 20 maisons bois massif conçues et réalisées par huit constructeurs et fabricants membres du réseau Afcobois, implantées sur tout le territoire français, et à les comparer aux calculs réglementaires RT 2000.





En réponse aux attentes des constructeurs et des institutions, l'étude a donc eu pour objectifs :

- d'évaluer les qualités thermiques et les performances énergétiques globales des maisons dans des situations variées,
- de mettre en évidence les qualités de confort (toutes saisons) spécifiques à ces constructions,
- de comparer la consommation d'énergie pour le chauffage mesurée sur site et les valeurs obtenues par le calcul (méthodes RT 2000 et DEL-2).

Les mesures ont été mises en place et supervisées de février 2005 à avril 2006 avec l'aide des occupants, sur des maisons individuelles utilisées dans des conditions normales. La surface habitable moyenne des maisons est de 160 m<sup>2</sup> (de 80 à 280 m<sup>2</sup>), et le taux de vitrage moyen est égal à 16 %. Les types de chauffages sont représentatifs des solutions habituellement rencontrées dans le cas d'un habitat individuel hors des villes.

## Étude des consommations chauffage

Les maisons étudiées ont des températures de 12 % inférieures, en moyenne, aux 18 °C de base, et les conditions minimales de confort sont globalement maintenues durant la période de chauffage dans ces maisons.

### Performances réglementaires et consommations pour le chauffage

- ⇒ Seule la maison M14 en rondins de 280 mm présente un coefficient inférieur à la valeur de référence.
- ⇒ 7 maisons sont non conformes (présentent un coefficient U supérieur de plus de 30 % à la valeur de référence).
- ⇒ En moyenne, les 20 maisons dépassent de 22 % la référence.

- ⇒ 8 maisons d'épaisseur de paroi de 100 à 300 mm satisfont l'exigence sur le critère de consommation globale C.

- ⇒ 15 maisons présentent des consommations de chauffage mesurées inférieures aux consommations de chauffage calculées. Parmi les 5 maisons restantes, 3 ont des problèmes de chauffage ou d'isolation repérés pendant l'étude.

- ⇒ La moyenne de consommation réelle des 20 maisons est de 18 % inférieure au calcul RT 2000.

Si toutes les maisons sont ramenées aux mêmes conditions climatiques :

- ⇒ Les consommations annuelles donnent une valeur moyenne de 71,5 kWh/(m<sup>2</sup>.an).
- ⇒ On ne peut pas établir de relation entre l'épaisseur du madrier et la consommation mesurée.

## Niveaux de température intérieure et de confort thermique

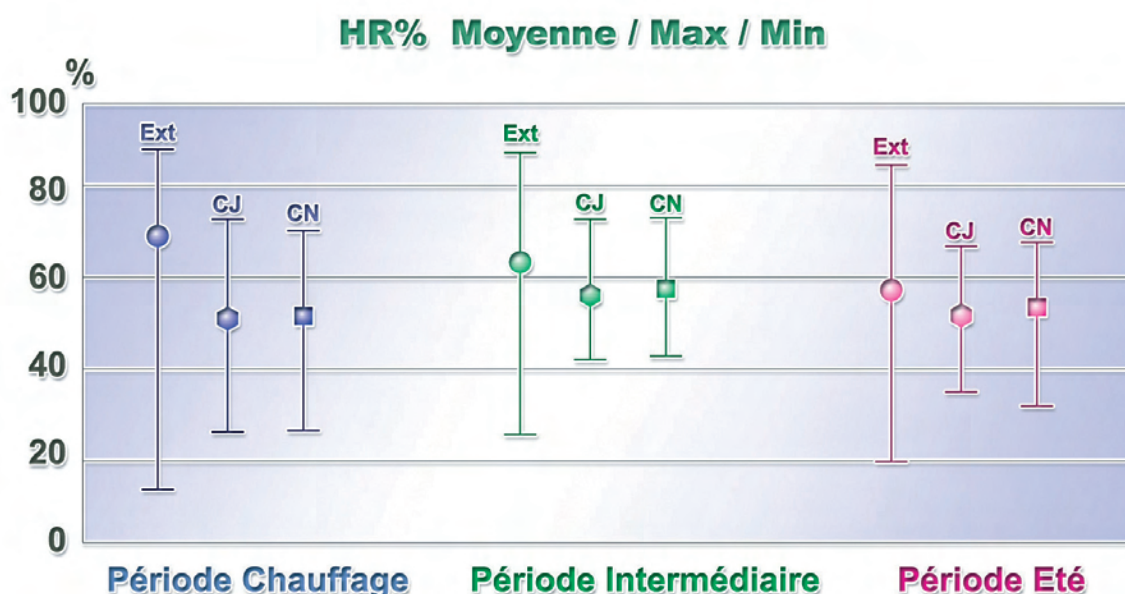
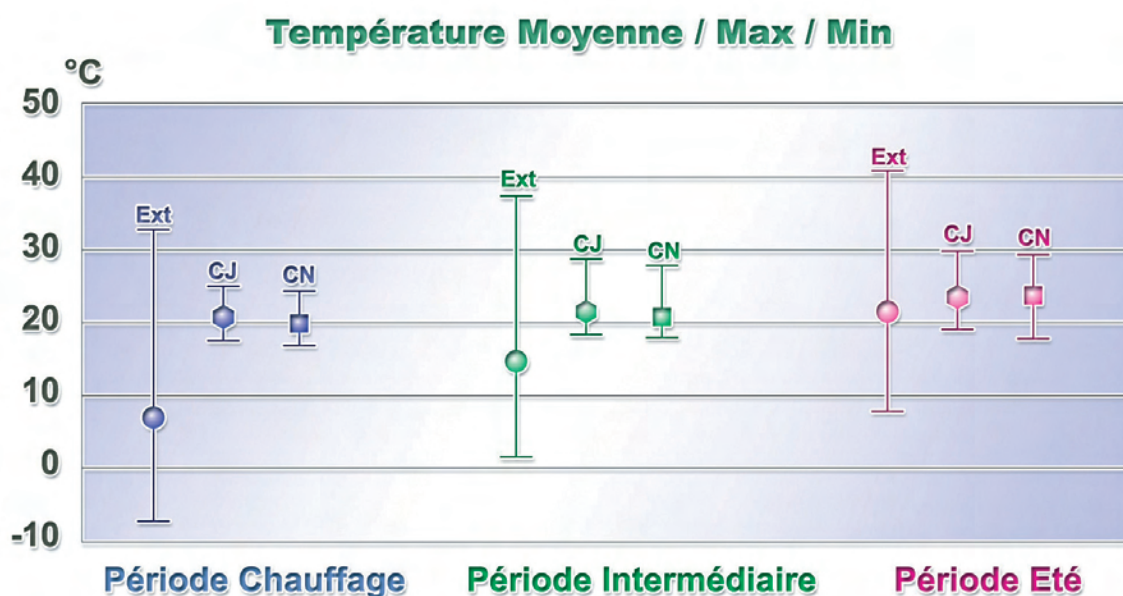
### Mesures de température et humidité relative

Les valeurs moyennes, maximales, minimales de la température et d'humidité relative sont représentées (cf. graph. p. 54) pour l'ensemble des maisons sur deux zones, jour et nuit, et à l'extérieur. Dans le cadre de l'étude, le traitement a été réalisé pour chaque maison.

- ⇒ On constate un effet de réduction des amplitudes thermiques par rapport aux conditions extérieures.
- ⇒ La température moyenne à l'intérieur des maisons reste comprise entre 18 et 22 °C, les valeurs minimales indiquent les périodes inoccupées (vacances) pendant lesquelles le chauffage est réduit. La température maximale reste toujours inférieure à 25 °C pour 65 % des maisons.



Température et humidité relative sur les trois zones de maison (extérieur, coin jour, coin nuit) pour trois périodes (PC: période de chauffage; PI: période intermédiaire; et PE: période d'été).



⇒ La température moyenne est inférieure à 25 °C pour 95 % des maisons. La température maximale reste inférieure à 28 °C dans 85 % des cas. Pour la totalité des maisons, les propriétaires sont satisfaits du confort thermique, en dehors de défauts ponctuels souvent liés à des problèmes de mise en œuvre des isolations (en particulier aux liaisons entre parties verticales et plafonds).

⇒ Concernant les niveaux d'humidité relative mesurés, les valeurs restent dans les limites acceptables pendant les deux périodes hiver et été ; les maximums relevés au-dessus de 60 % ne représentent pas plus de 2 % du temps.

## Confort thermique

Le confort est un critère important, pour le bien-être de la personne qui occupe les lieux comme pour assurer ses activités dans de bonnes conditions. Il peut être atteint seulement lorsque la température, l'humidité et le mouvement de l'air se situent à l'intérieur des limites de ce que l'on appelle la "zone de confort".

⇒ Pour 14 des 20 maisons, pendant la période hiver, le local est sous-chauffé moins de 10 % du temps. Pour 2 maisons seulement, le taux de sous-chauffe est supérieur à 35 % du temps.

⇒ Pendant la période été, le ratio de "surchauffe" reste inférieur à 10 % pour les 20 maisons.

⇒ Malgré l'absence de systèmes de ventilation mécanique, les niveaux de confort hygro-thermique observés pendant la période hiver comme pendant la période chaude sont très satisfaisants pour la plupart des cas.

### Confort d'été et réglementation

La RT 2000 intègre des exigences relatives au confort d'été, l'objectif étant de réduire, autant que possible, l'inconfort au sein des bâtiments non climatisés. Le respect de la réglementation est assuré notamment si la température maximale atteinte en été doit rester inférieure à celle obtenue dans le bâtiment où seraient appliquées les solutions de référence.

Pour comparaison, nous avons choisi la semaine de mesures la plus chaude avec une température extérieure maximale allant jusqu'à 41,3 °C dans certaines régions, variant selon la situation géographique et l'altitude de chaque maison.

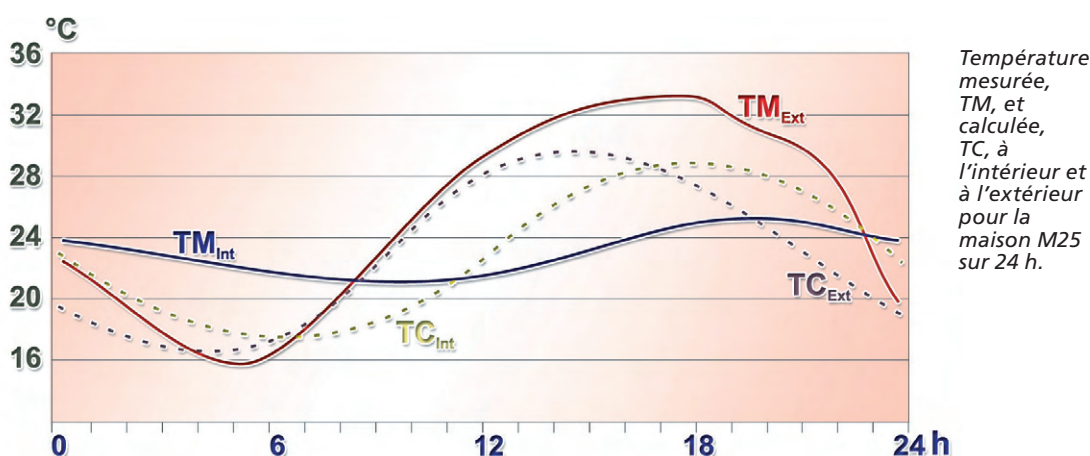
11 "non réglementaires" pourtant :

- ⇒ Les écarts maximaux journaliers de température intérieure sont de 6 °C pour 16 des 20 maisons et, ce, même pour des maisons construites en madriers de 100 mm.
- ⇒ Qui plus est, sauf dans deux cas, la température extérieure prise pour référence est inférieure aux températures réelles mesurées sur site sur la semaine étudiée.

#### Exemple : maison située à Tarbes (65)

Comparons sur 24 h les amplitudes de température intérieure et extérieure obtenues par le calcul RT 2000 avec celles obtenues par la mesure :

- Le calcul traduit un simple déphasage de 2 h, mais aucun écart d'amplitude de température entre intérieur et extérieur.
- Non seulement l'amplitude de la température intérieure mesurée reste inférieure à 5,7 °C pendant la période d'été, alors que l'amplitude calculée est de 10,8 °C, mais les conditions extérieures mesurées sont plus fortes que les données climatiques de référence.



Sur les 20 maisons, les amplitudes de température intérieure (écarts entre maximum et minimum sur 24 h) obtenues par la mesure sur site varient de 2,7 à 9,1 °C avec une moyenne de 5 °C, alors que les amplitudes des valeurs obtenues par le calcul sont comprises entre 6 et 13,2 °C avec une moyenne de 9,4 °C.

L'effet d'atténuation thermique des maisons en bois massif est très insuffisamment traduit par les résultats des calculs thermiques. Les mesures réalisées mettent en évidence un niveau de confort beaucoup plus important que celui présenté par la réglementation pendant la période d'été.

L'effet "inertiel", proportionnel aux épaisseurs de mur, favorise le maintien des températures intérieures et donc le confort d'été.

Le "garde-fou" RT 2000, basé sur le coefficient U du mur extérieur et la seule valeur de résistance thermique brute, rend non réglementaire la majorité des constructions en bois et cause un préjudice important à ce type de construction. Saed Raji, par le biais de son travail de doctorat, prouve pourtant que les qualités et caractéristiques propres à ces parois rendent ces constructions thermiquement performantes et confortables en toute saison.

## Partie 2 : Confort hygrothermique et ventilation des maisons bois massif

### Introduction

#### Confort et règles de ventilation dans l'habitat

Le confort hygrothermique est un critère très important pour la santé et l'activité des personnes comme pour la longévité du bâtiment. Le confort hygrothermique peut être atteint seulement lorsque la combinaison des paramètres, tels que la température, l'humidité et le mouvement d'air, se situe à l'intérieur des limites de ce que l'on appelle la "zone de confort".

Les dommages dus à l'humidité sont une des causes principales de la détérioration de l'enveloppe des bâtiments, d'où l'importance de l'analyse des flux de vapeur et des conditions d'humidité dans la

Une inertie élevée des matériaux de construction est un excellent amortisseur thermique et sert de "tampon" par effet de stockage thermique.

#### Contexte et objectifs du projet "Confort Bois"

Ce travail mené depuis 2004 s'appuie sur un projet technologique soutenu par le pôle environnement aquitain financé par le conseil régional d'Aquitaine au profit de la société Confort Bois (33). L'étude a consisté en premier lieu à détailler les différentes caractéristiques de transfert thermique et hydrique de la paroi bois massif, ainsi que l'influence du comportement dynamique et du transfert aérodynamique sur la performance thermique de l'ensemble. En second lieu, à déterminer le confort et l'usage de



conception. L'humidité sous forme liquide ou vapeur peut endommager la structure, réduire la résistance thermique, changer les propriétés physiques et même déformer des matériaux de construction. L'analyse est donc nécessaire, à la fois pour bien conserver l'enveloppe du bâtiment et maintenir une bonne qualité d'air intérieur, donc satisfaire les exigences de confort et de santé.

Ces qualités imposent, d'un côté, une isolation thermique suffisante par rapport à l'extérieur, de l'autre, un amortissement des variations de température, en particulier des variations journalières.

ce type de construction et, ce, par rapport à une maison traditionnelle.

Comme vu dans le premier chapitre, les maisons en bois massif ne possèdent généralement aucun système de ventilation mécanique, mais on constate que les occupants sont toujours satisfaits de leur confort. Selon les questionnaires posés aux propriétaires, la ventilation naturelle assure ici une qualité d'air toujours jugée "acceptable" pour la santé. Concernant la durabilité des bâtiments, les constructeurs du réseau ne rencontrent jamais aucun problème de dégradation ou de durabilité



des parois de construction.

Confort Bois souhaitant améliorer les connaissances actuelles sur le fonctionnement et les performances réelles des bâtiments en bois massif, il a été demandé au laboratoire TREFLE de mener une étude expérimentale détaillée sur deux maisons en bois massif à usages différents. L'objectif poursuivi à terme étant d'améliorer les connaissances afin d'optimiser la conception et l'usage de ces constructions.

Une campagne de mesures "longue durée" ainsi que des mesures spécifiques sur 2 bâtiments Confort Bois (2000 et 2002) situés à 50 km de Bordeaux ont été réalisées : sur un bâtiment à usage de bureaux, et sur un bâtiment d'habitation ici développé.

## Confort hygrothermique

### Températures

Pour la période d'été, la température dans le bâtiment d'habitation reste inférieure à 25 °C sur plus de 72 % du temps de mesure.

Brager (1994) a défini une norme (Adaptive standard for naturally ventilated buildings) pour évaluer le confort thermique dans les bâtiments.

- ⇒ En hiver, 93 % des températures sont bien entre les deux limites de la zone Brager.
- ⇒ En été, 100 % des points de mesures sont inférieurs à la limite supérieure, 50 % des points mesurés sont inférieurs à la limite basse.

Le bâtiment d'habitation a un bon fonctionnement thermique aussi bien dans les conditions d'hiver que dans les conditions d'été. En particulier, dans les conditions d'été et de "demi-saison" ( $T_{ext} > 20$  °C), les températures intérieures constatées sont inférieures de 2 °C en moyenne aux limites basses indiquées par la zone Brager.

### Humidité

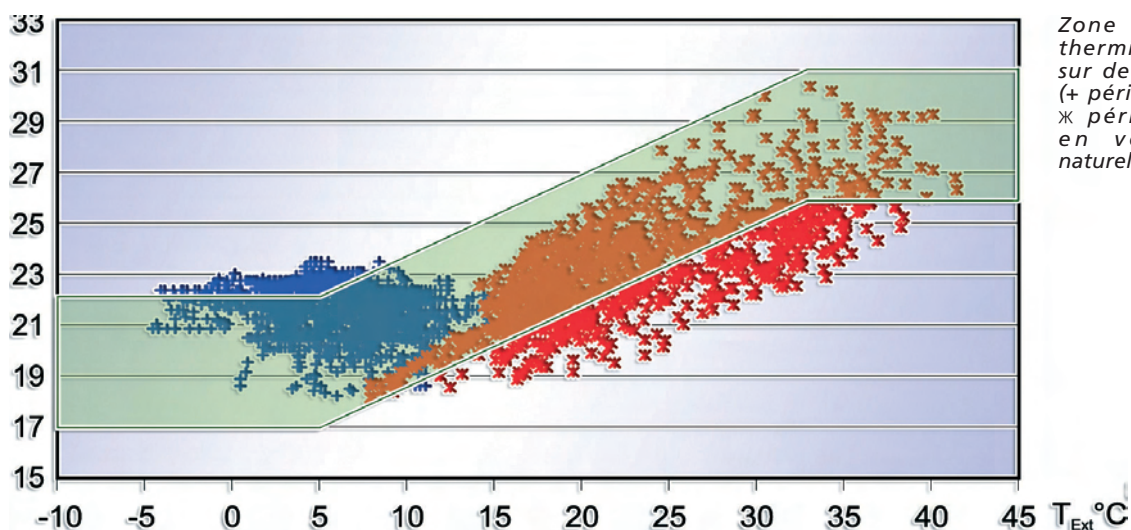
Dans le bâtiment d'habitation, pendant la période d'hiver, on trouve que les points de mesure pour le coin jour se situent totalement dans la zone de confort, et la température dans le coin nuit reste totalement acceptable avec 17 % des points de mesure inférieurs à 18 °C, d'où une bonne gestion du chauffage.

## Qualité d'air intérieur (QAI)

### Taux de CO<sub>2</sub>

La qualité d'air à l'intérieur des bâtiments est liée à la concentration de plusieurs polluants. La concentration en CO<sub>2</sub> est considérée comme un indicateur représentatif de la qualité de l'air et, en particulier, du taux de ventilation. La première source de CO<sub>2</sub> dans les bâtiments est la respiration des occupants. Si le taux de CO<sub>2</sub> dans les bâtiments publics ou dans les logements varie entre 500 et 2 500 ppm<sup>1</sup>, la concentration optimale doit rester inférieure à 1 000 ppm dans l'habitat (Erdmann et al. 2001). La norme 62-89 (ASHRAE)<sup>2</sup> définit un niveau acceptable de concentration en CO<sub>2</sub> à 1 000 ppm à l'intérieur du bâtiment (ASHRAE, 2002). La valeur limite de CO<sub>2</sub> définie par de nombreux pays est fixée à 1 000 ppm. Signalons qu'une concentration en CO<sub>2</sub> de 2 000 ppm maintenue durant plus d'une heure entraîne chez certaines personnes des maux de tête, une fatigue générale et un endormissement.

- ⇒ Pour 90 % des points de mesure, le taux de CO<sub>2</sub> mesuré est inférieur à 700 ppm.
- ⇒ Le taux est supérieur au seuil de 1 000 ppm moins de 2 % du temps.

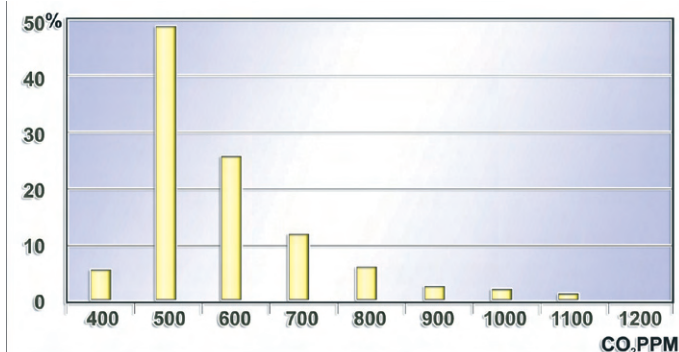


Zone de confort thermique Brager sur deux périodes (+ période d'hiver, \* période d'été) en ventilation naturelle.

<sup>1</sup> ppm : partie par million

<sup>2</sup> American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

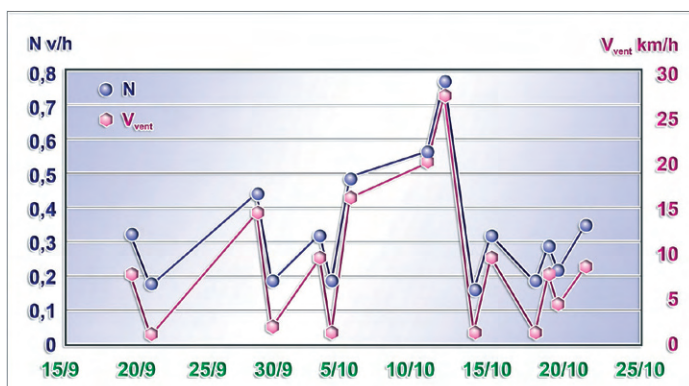




Ici, sans VCM, le taux de CO<sub>2</sub> relevé est constamment satisfaisant.

## Taux de renouvellement d'air et vitesse du vent

On relève la direction et la vitesse du vent pendant les mesures de renouvellement d'air.



Taux de renouvellement d'air N et vitesse moyenne du vent V sur 1 mois.

La perméabilité de bâtiments en bois massif est liée directement à la vitesse du vent : le taux de renouvellement d'air varie de 0,2 à 1,2 vol/h pour une vitesse du vent de 0 à 30 km/h.

## Conclusion et perspectives

Le bois, matériau renouvelable, nécessite peu d'énergie pour être mis en œuvre au cours des étapes d'une construction. Intégré à l'enveloppe d'un bâtiment, il permet, par ses bonnes qualités thermiques, de bénéficier d'un très bon confort intérieur et de réaliser des économies d'énergie lors de l'exploitation. Le développement de la construction bois constitue un enjeu fondamental et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. Les maisons bois massif sont durables, conservent leurs propriétés thermiques au cours du temps, ne diffusent pas d'allergisants, ni de poussière.

L'analyse in situ des performances thermiques et énergétiques réalisées sur les 20 maisons en bois massif montre un niveau de confort hygrothermique

très satisfaisant pendant la période de chauffage comme pendant les périodes les plus chaudes. À conditions égales, la consommation mesurée pour le chauffage des maisons en bois massif, pendant la période de chauffage, est en moyenne de 15 % inférieure à celle calculée par la méthode de la RT 2000.

À partir des mesures de consommation, on a pu noter que :

- La moyenne générale de ces consommations pour le chauffage est de 85 kWh/m<sup>2</sup>.
- Plus du tiers ont une consommation annuelle mesurée pour le chauffage inférieure à 60 kWh/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à un très bon niveau de performance énergétique par rapport à l'habitat standard.
- L'influence de l'épaisseur du mur sur la consommation d'énergie n'est pas marquée par rapport aux autres critères.
- L'effet d'atténuation thermique et de confort d'été des maisons en bois massif est très insuffisamment traduit par les calculs réglementaires.

La RT 2000 prend assez mal en compte le comportement et les performances réelles de bâtiments à isolation répartie et inertie thermique. Le critère "garde-fou" qui caractérise la paroi en régime thermique permanent est sûrement bien adapté à l'évaluation de parois légères, mais s'avère inapproprié pour l'évaluation des performances de parois lourdes comme celles en bois massif, et représente une indication incomplète sur la qualité thermique réelle de ces solutions.

Le projet a fait l'objet d'un rapport final remis en février 2006 qui permettra à l'Afcobois de déposer prochainement aux institutions un dossier d'études pour cas particuliers (annexe V de l'arrêté du 26 mai 2006 fixant la RT 2005). S'appuyant sur les résultats de l'étude, un aménagement spécifique sera demandé pour ce type de construction, accompagné d'une méthode d'évaluation adaptée.

Les résultats de la campagne de mesure menée sur le confort hygrothermique et la qualité de l'air dans deux bâtiments tests Confort Bois en l'absence de ventilation mécanique montrent que :

- Le confort thermique est optimal en période de chauffage, mais aussi, et c'est très important, en période chaude. Cette indication est également vérifiée à l'échelle de l'étude des 20 maisons. Le taux de confort dans les maisons en bois massif est directement lié à l'usage du bâtiment.
- Les mesures de qualité d'air intérieur montrent que la concentration en CO<sub>2</sub> dans le bâtiment d'habitation est maintenue à un niveau satisfaisant par rapport aux valeurs de référence.
- Le taux de renouvellement d'air est très variable, allant de 0,2 à 1,2 vol/h en fonction de l'exposition au vent et de la vitesse du vent mesurée.

Aujourd'hui, Confort Bois va plus loin et poursuit ses travaux de recherche : le bureau d'études a entamé en décembre 2006 un nouveau programme, sur 12 mois, avec la cellule Écocampus du laboratoire TREFLE, visant à définir de nouvelles solutions d'habitat bois basse énergie, sain et confortable, par le biais d'outils d'aide à la conception et de validations in situ.

Ce travail s'appuie sur plusieurs études menées, d'une part, dans le cadre d'une collaboration entre le laboratoire TREFLE et l'entreprise Confort Bois, entre 2003 et 2006 (travaux financés par le conseil régional d'Aquitaine, pôle environnement aquitain), d'autre part dans le cadre d'une action nationale, initiée par Confort Bois et visant à expérimenter 20 maisons en bois massif. Cette étude, menée entre 2004 et 2006 par Pouget Consultants, Costic et TREFLE, a été financée par la Fédération française du bâtiment, l'association Afcobois (représentée par Confort Bois) et la Région Franche-Comté.

#### Intervenants :

**Laboratoire TREFLE (laboratoire interétablissement ENSAM/université Bordeaux I/CNRS (33)) :**

Philippe LAGIERE

Jean-Rodolphe PUIGGALI

Saed RAJI



**Entreprise Confort Bois (33) :**

Frédéric BAETEN

Marie PAULY



La société Confort Bois a coordonné ces travaux et les a accompagnés par l'engagement à temps plein d'un ingénieur de recherche au sein de l'entreprise.

## Les professionnels de la construction bois méritent tous nos supports

### Tous les jours Woodsurfer.com : un bouquet de services pour la filière bois construction

- Lettre d'information quotidienne par courriel
- Petites annonces gratuites
- Annuaire bois construction en ligne
- Vidéos des grands rendez-vous professionnels sur Wood Surfer TV

### Tous les deux mois Wood Surfer vous propose :

- des dossiers techniques
- des reportages
- une veille technologique : produits, actualités de la filière, négoce...



**Abonnez-vous au magazine Wood Surfer sur [www.woodsuffer.com](http://www.woodsuffer.com)**